

Національний університет “Львівська політехніка”

КЛИМЕНКО ОЛЕКСАНДР ДМИТРОВИЧ



УДК 621.9.048.6

**ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ СИЛОВИХ ЗУБЧАСТИХ
ПЕРЕДАЧ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВОЮ
ЗМІЦНЮВАЛЬНОЮ ОБРОБКОЮ**

05.02.08 - технологія машинобудування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів - 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Луцькому державному технічному університеті та Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Афтаназів Іван Семенович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри “Технологія машинобудування”.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лебедев Володимир Георгійович
Одеський національний політехнічний університет, м. Одеса,
професор кафедри “Технологія конструкційних матеріалів і
матеріалознавство”;

кандидат технічних наук, доцент
Нахаєв Петро Петрович,
Український державний лісотехнічний університет, м. Львів,
доцент кафедри “Прикладна механіка”.

Провідна установа: Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
кафедра “Технологія машинобудування”,
Міністерство освіти і науки України, м. Київ.

Захист відбудеться 19 травня 2004р о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д35.052 06 у Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, Львів-13, вул. С.Бандери, 12, ауд 226 гол. корп.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, Львів-13, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий 15 квітня 2004 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Форнальчик Є.Ю

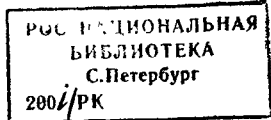
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Важливим завданням машино- і приладобудування є забезпечення міцності, надійності і довговічності як вузлів і агрегатів машин та приладів в цілому, так і їх деталей при мінімальних матеріаломісткості і затратах на виготовлення. У переважної більшості машин забезпечення точності передачі кінематичних рухів та крутних моментів покладено на різноманітні зубчасті зачеплення, основною ланкою яких є зубчасте колесо. Складна за своєю будовою, трудомістка у виготовленні ця деталь в силу, як правило, важких умов та режимів експлуатації є визначальною ланкою у визначенні ресурсу механізму чи машини і хоч вже століттями використовуються найрізноманітніші зубчасті передачі, технологічний процес виготовлення зубчастих коліс все ще залишається недосконалим. Він трудомісткий, високо вартісний, однак, доволі часто, неспроможний задовільнити складні умови експлуатації, в результаті чого обмежує довговічність виробів машинобудування. Якщо врахувати багатомільйонні програми виготовлення зубчастих коліс загального призначення, то підвищення лише на 1% їх надійності забезпечує річний економічний ефект біля 1 млн. гривень.

Довговічність зубчастих коліс забезпечують застосуванням різноманітних зміцнювальних та оздоблювально-викінчувальних технологічних процесів. Серед них провідне місце належить зміцненню зубів коліс поверхневим пластичним деформуванням (ППД). Підвищення втомної міцності, опору викришуванню матеріалу, його зносостійкості в результаті зміцнення ППД бокових поверхонь зубів, у поєднанні з дешевизною і простотою реалізації, дають підстави для широкого його застосування. Однак, на заваді цьому стала неспроможність відомих різновидів способів зміцнення ППД як статичної, так і динамічної дії у забезпеченні значної енергії деформування, здатної підвищити рівень фізико-механічних властивостей матеріалу поверхневих шарів зубів до рівня вимог експлуатації.

Отже, актуальними залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення відомих і розроблення нових високоефективних та продуктивних методів зміцнення зубів зубчастих коліс.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дисертаційна робота виконана у рамках спільних науково-дослідних робіт кафедр "Матеріалознавство та обробка металів тиском" Луцького державного технічного університету та "Технологія машинобудування" Національного університету "Львівська політехніка" за загальною тематикою "Розробка і дослідження ресурсо- та енергоощадних технологій із використанням низькочастотних вібрацій" (2000-2004 рр.). Вона пов'язана безпосередньо з



науково-дослідними роботами ДБ/Зміцнення “Дослідження впливу поверхневого зміцнення зубчастих коліс на довговічність передач, розробка зміцнювальних технологій і реалізуючого їх обладнання” (держ реєстр. № 0100U000511) та ДБ/Фреза “Розроблення методології проектування та оптимізації технології виготовлення зубчастих коліс на основі нових різальних інструментів, схем різання та формоутворення” (держ. реєстр. № 0102U001203) Ці роботи виконувались згідно з Координаційним планом Комітету з питань науки і техніки та Міністерства освіти і науки України на 2000-2004 роки (розділ “Машинобудування”, позиція 43: “Високоефективні технологічні процеси в машинобудуванні”).

Мета і задачі досліджень. *Метою* роботи є розробка і дослідження ефективного методу зміцнення зубчастих коліс силових передач поверхневим пластичним деформуванням з високим рівнем енергії деформування для підвищення надійності силових передач та продуктивного оснащення для його здійснення.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси виготовлення циліндричних сталевих зубчастих коліс силових передач, зокрема оздоблювально-вікінчувальні операції, оснащення для їх реалізації

Предмет дослідження – метод зміцнення робочих бокових поверхонь зубів циліндричних зубчастих коліс силових передач для підвищення зносостійкості матеріалу, покращення його фізико-механічних властивостей.

Методи дослідження – теоретичні дослідження динаміки процесу вібраційно-відцентрового зміцнення зубчастих коліс (ВВЗК) виконувались на основі теорії синхронізації динамічних систем і математичного опису законів обкочувального руху обкатників із використанням методів А.М Ляпунова та А Пуанкаре. Експериментальні дослідження динаміки процесу та визначення сили деформування проводили із використанням методик тензометрії та вібровимірювального комплексу апаратури. Параметри якості зміцнювальної обробки оцінювали за показниками товщини зміцненого шару, поверхневої мікротвердості та напружено-деформівного стану матеріалу зубів у приповерхневих шарах, шорсткості зміцненої поверхні, яку вимірювали за стандартними методиками Розробку програм опрацювання результатів експериментальних досліджень, методик розрахунку і проектування зміцнювачів відцентрової дії та вібраційних машин для ВВЗК здійснено на базі програмного забезпечення “Компас”, “Mathcad”, “Autocad” з використанням персональної електронно-обчислювальної техніки.

Для досягнення мети у роботі сформульовані та розв'язувалися наступні **задачі:**

1. Розробка і дослідження ефективного методу зміцнення робочих бокових поверхонь зубів зубчастих коліс силових передач поверхневим пластичним деформуванням, який базується на вібраційно-відцентровому

зміцнювальному оброблюванні із значною енергією деформування та високою продуктивністю.

2. Теоретичні та експериментальні дослідження динаміки процесу вібраційно-відцентрового зміцнення коліс для визначення його оптимальних технологічних параметрів.

3. Експериментальне визначення впливу основних технологічних параметрів ВВЗК на непрямі показники надійності зубчастих коліс та їх довговічність.

4. Розробка математичних залежностей впливу основних технологічних параметрів процесу ВВЗК на визначальні (для зубчастих коліс силових передач) непрямі показники їх надійності - контактну міцність, напружений стан, поверхневу мікротвердість, товщину зміцненого шару, зносостійкість.

5. Проведення порівняльних втомних досліджень виготовлених за типовими технологічними процесами зубчастих коліс і коліс, зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою, розробка на їх основі методики побудови технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс силових передач із врахуванням їх конструктивних особливостей та умов експлуатації.

6. Розробка методики проєктування та розрахунку оснащення для вібраційно-відцентрового зміцнення зубчастих коліс та програмних продуктів для реалізації.

Наукова новизна одержаних результатів у теоретичному плані полягає в тому, що вперше встановлено та математично описано умови самозбурення і стійкого підтримування обкочувального руху обкатника по деформівних тілах, розміщених у сепараторі з можливістю радіального переміщення. Це дало змогу визначити характер енергетичної та силової взаємодії обкатника із матеріалом оброблюваної зміцненням деталі при контактуванні їх через деформівні тіла, сприяючи цим подальшому розвитку теорії синхронізації динамічних систем. Це поширює сферу промислового застосування явища "підтримування обкочувального руху тіла при гармонійних коливаннях його осі" на технологічні зміцнювальні операції.

У прикладному плані новизна результатів полягає у створенні нового методу зміцнювальної обробки, який вигідно відрізняється поєднанням високої продуктивності із значною енергією деформування, відкриваючи можливість якісного зміцнення не тільки деталей складної конфігурації, а й деталей із важкооброблюваних матеріалів, наприклад, високолегованих сталей, титанових сплавів тощо.

Практичне значення одержаних результатів Розроблений і досліджений новий метод вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки зубчастих коліс дозволить істотно розширити сферу промислового використання зміцнювальних технологій, підвищити надійність і довговічність

зубчастих передач. Високий рівень енергії деформування, характерний зносостійкий мікрорельєф оброблених поверхонь дають підставу для заміни в технологічному процесі виготовлення зубчастих коліс ряду вартісних і енергомістких термічних операцій із супутніми оздоблювально-викінчувальними на дешеву і високопродуктивну операцію поверхневого зміцнення. З урахуванням масовості виготовлення зубчастих коліс це дасть значний економічний ефект.

Якісне зміцнення бокових поверхонь зубів вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою при високій енергії деформування дасть змогу під час виготовлення зубчастих коліс замінити дорогі леговані та покращенні конструкційні сталі на дешевші матеріали, що суттєво знизить собівартість виготовлення деталей зубчастих передач.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні задач досліджень [4], розробленні, експериментальному та теоретичному дослідженні методу вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки зубчастих коліс та спорядження для його реалізації [2, 3], створенні методики вибору його оптимальних технологічних параметрів [1, 5], опрацюванні даних теоретичних та експериментальних досліджень та аналізі їх результатів [6]

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи відображено у доповідях на міжнародних науково-технічних конференціях і симпозіумах - "Прогресивна техніка і технологія – 2002" (Київ-Севастополь, 2002 р.); "Прогресивна техніка і технологія – 2003" (Київ-Севастополь, 2003 р.); "6-ий Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові" (Львів, 2003 р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено у чотирьох статтях у науково-технічних виданнях та вісниках (серед них одна одноосібна), які входять до переліку фахових та одній науковій монографії (у співавторстві).

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Повний обсяг дисертації - 298 с., в т. ч 53 рис., 8 табл.; додатки – на 84 с. Список використаних літературних джерел налічує 103 позиції.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику дисертаційної роботи, обґрунтовано актуальність теми, мету і завдання досліджень, наукову новизну та практичну цінність роботи.

У **першому розділі** на підставі аналізу літературних джерел окреслено основні напрями вдосконалення технологічних процесів виготовлення циліндричних сталевих зубчастих коліс силових передач для підвищення їх надійності та довговічності.

Аналіз найрозповсюдженіших видів пошкоджень та руйнувань зубів

зубчастих коліс силових передач дав підставу для висновку, що визначальною для підвищення довговічності коліс є забезпечена на етапі виготовлення якість поверхонь зубів, яка поєднує в собі геометричну точність виготовлення поверхонь, включаючи і її чистоту, із відповідними фізико-механічними властивостями матеріалу зубів, у першу чергу, у приповерхневих шарах. Аналіз типових технологічних процесів виготовлення зубчастих коліс свідчить, що переважна більшість операцій спрямована на забезпечення геометричної точності зубів і є малоефективною щодо формування належного напружено-деформівного стану матеріалу. Це стосується і наявних у сучасному арсеналі оздоблювально-викінчувальних операцій, включаючи і зміцнювальні, переваги і недоліки яких проаналізовано. Специфіка умов експлуатації зубчастих коліс силових передач, полягає в тому, що внаслідок значних зусиль контактної взаємодії зубів між собою, вже на етапі припрацювання швидко видозмінюється початковий рельєф бокової поверхні зубів, формуючи новий експлуатаційний. Тому визначальним, щодо надійності зубчастих коліс, постає не стільки чистота поверхні, як стан матеріалу, зокрема його мікрорельєф, поверхнева мікротвердість, напружений стан. Із оздоблювально-викінчувальних операцій тільки методи поверхневого пластичного деформування (ППД) спроможні забезпечити та регулювати у певних межах ці параметри стану матеріалу. Однак, відомі методи ППД, як показав аналіз, через обмежену енергію деформування неспроможні забезпечити належну якість зміцнювальної обробки матеріалу зубів. Винятком є лише карбування, але через низьку продуктивність воно не придатне для такої масової деталі, як зубчасте колесо.

Усе це дозволило окреслити основний напрям досліджень у роботі, а саме: розробка, теоретичне та експериментальне вивчення нового високопродуктивного методу поверхневого зміцнення матеріалу бокової поверхні зубів зубчастих коліс силових передач, який, завдяки значній енергії деформування, забезпечує задані фізико-механічні властивості матеріалу поверхневих шарів та мікрорельєф робочих поверхонь зубів, чим підвищується надійність і довговічність як безпосередньо зубчастих коліс, так і передач в цілому.

У *другому розділі* обґрунтовано вибір напрямів та розкрито методика досліджень. Основні напрями досліджень дисертаційної роботи можуть бути окреслені як визначення шляхів та методів технологічного забезпечення якості зубчастих коліс силових передач, зорієнтованих на підвищення їх надійності та довговічності.

Методику теоретичних досліджень становили основи теорії синхронізації динамічних систем, на підставі якої отримано математичні залежності, що описують закони руху основних елементів зміцнювачів зубчастих коліс. При

цьому, використовувались методи незначного (малого) параметра А Пуанкаре та стійкості періодичних розв'язків А.М.Ляпунова для опису характеру силової взаємодії обкатників та деформівних елементів із матеріалом зубчастих коліс, а також умов для встановлення самозбурення та стійкого підтримання обкочувального руху обкатників.

Експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів процесу на непрямі показники надійності зубчастих коліс, дослідження з визначення сили деформування здійснювали з використанням комплексу вібровиміральної апаратури. Показники якості зміцнення визначали за стандартними загальноприйнятими методиками.

Розглянуто запропоновані конструкції зміцнювачів вібраційно-відцентрової дії Одну з них наведено на рис. 1.

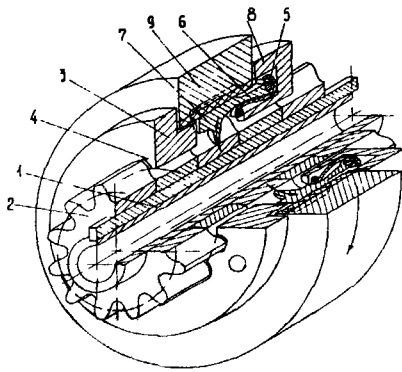


Рис. 1. Конструкція зміцнювача зубчастих коліс (обробка деформівними елементами)

Зміцнювач складається з корпуса-сепаратора 3, який своїми зубцями-виступами 4 базується на набраному на осі 1 за допомогою шпонки блоку оброблюваних зубчастих коліс 2 В корпусі 3 навпроти кожної із впадин зубчастого колеса виконано отвір, в який встановлено підпружинений пружиною 6 деформівний елемент 7, що провертається навколо осі 5. Форма деформівних елементів відповідає фрагменту форми впадини зубів оброблюваного зубчастого колеса, а твердість їх матеріалу перевищує твердість матеріалу оброблюваних зубчастих коліс. Кожен із деформівних елементів (рис. 2) оснащений ударною А та деформуючою В частинами, причому ударна виступає за межі циліндричної частини корпуса-сепаратора 3.

Між виступами 8 корпуса-сепаратора вільно розміщений футерований гумою обкатник 9 у вигляді циліндричного кільця.

Осі 1 надають плоскопаралельних кругових коливань у вертикальній площині з амплітудою А, рівною модулю зубів зміцнюваних коліс, і

частотою f . Під дією коливань обкатник 9 зміцнювача втягується у так званий режим вібраційного підтримування обертання, що супроводжується обкатуванням обкатника 9 (рис. 1) своєю внутрішньою поверхнею по циліндричній поверхні корпусу-сепаратора 3. При цьому частота обкатування обкатника рівна частоті коливань рами вібрмашини f , тобто за один період коливань рами обкатник здійснює один обкатний рух (одне перекочування) своєю внутрішньою поверхнею по поверхні корпусу-сепаратора, повернувшись на початок наступного періоду у початкове положення. Набігаючи при своєму обкатному русі на ударні ділянки А деформівних елементів обкатник 9, долаючи опір пружини 6, переміщає деформівні елементи у радіальному напрямку до жорсткого удару деформувальною ділянкою В по поверхні впадини того зуба оброблюваного зубчастого колеса 2, у якій цей деформівний елемент розміщений. Переміщенням зміцнювача вздовж геометричної осі зубчастих коліс досягають рівномірності зміцнення за довжиною твірної зуба.

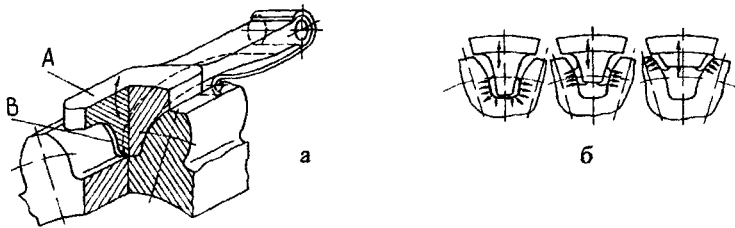


Рис. 2. Конструкція деформівного елемента (а) та схема зміцнення фрагментів бокової поверхні зубів (б)

Якщо використовують як деформівні тіла сталеві загартовані кульки, то їх вільно розташовують у впадинах зубів зміцнюваного зубчастого колеса, обмеживши від випадання торцевими стінками та кільцям-обмежувачем. В цьому разі масивний обкатник обкочується по виступаючих за вершини зубів кульках, передаючи через них жорсткі удари матеріалу бокової поверхні зубів.

В *третьому розділі* виконано теоретичне дослідження динаміки зміцнювачів вібраційно-відцентрової дії. На підставі розв'язку рівнянь, якими описують рух коливної системи, отримано математичні залежності для визначення енергетичних та силових параметрів процесу ВВЗК.

Так, силу деформування деформівними елементами матеріалу бокової поверхні зубів із достатньою для інженерних розрахунків точністю визначає залежність

$$P = m_0 \varepsilon \cdot \omega^2 = 4 \pi^2 m_0 \varepsilon f^2, \quad (1)$$

де m_0 – маса обкатника;

$\varepsilon \leq 4A$ – ексцентриситет обкатника;

$A = m_n$ – амплітуда коливань привідного тіла (у даному разі – зміцнюваного зубчастого колеса із модулем m_n);

$\omega = 2\pi f$ – кругова частота обкочувального руху;

f – частота коливань привідного тіла.

Енергію деформування матеріалу бокової поверхні зуба визначають за формулою:

$$E_3 = A_1 \left(1 - \frac{2\pi}{\gamma n} \right) \frac{\sin^2 \frac{\pi}{n}}{B + \cos^2 \frac{\pi}{n}}, \quad (2)$$

де γ – центральний кут між впадинами двох сусідніх зубів;

D_1 – діаметр розташування центрів підпружинених деформівних елементів;

J_0 – момент інерції обкатника;

n – кількість впадин зубів зміцнюваного колеса;

$$A_1 = 2\pi^2 f^2 m_n D_1^2 (1 + B); \quad B = \frac{4J_0}{m_n D_1^2}.$$

Товщина зміцненого шару в матеріалі бокової поверхні зуба визначається відповідними залежностями. Якщо використовують деформівні елементи:

$$a_d = \frac{K_2}{2\sqrt{b} D_1 f} \sqrt[4]{\frac{D_2 A_1 \left(1 - \frac{2\pi}{\gamma n} \right) \sin^2 \frac{\pi}{n}}{K_3 \cdot HB \left(B + \cos^2 \frac{\pi}{n} \right)}}. \quad (3)$$

де $K_2 = \frac{d_{\max}}{d}$ – коефіцієнт, який враховує співвідношення найбільшого (що залишається сталим) діаметра відбитку d_{\max} до діаметра відбитку d після першого удару при багатократному динамічному деформуванні;

$K_3 = \frac{H_T}{HB}$ – коефіцієнт, який враховує співвідношення динамічної твердості

H_T зміцнюваного матеріалу до його твердості HB за Брінелем;

$b = \frac{HB}{2\sigma_t}$ – коефіцієнт, який враховує співвідношення твердості зміцнюваного

матеріалу HB за Брінелем до його межі текучості σ_t під час розтягу;

$R_2 = \frac{D_2}{2}$ – радіус кривини бокової поверхні зуба на ділянці зміцнення деформівним елементом.

Якщо зміцнюють сталевими загартованими кульками:

$$a_k = \frac{K_2}{2\sqrt{\pi} \cdot b \cdot d \cdot D \cdot f} \sqrt[4]{\frac{m_n \cdot \varepsilon}{K_3 \cdot HB \cdot H \cdot B_1}}, \quad (4)$$

де D – діаметр деформівної кульки;

H – ширина зубчастого вінця зміцнюваного зубчастого колеса;

B_1 – віддаль між сусідніми зубами зміцнюваного колеса на діаметрі головок вершин зубів.

Тривалість зміцнення деформівними елементами визначається за виразом

$$T_{змд} = \frac{H \cdot m_1 \cdot n_1}{a_1 \cdot f}, \quad (5)$$

де m_1 – кількість повторних ударів при динамічному зміцненні, що супроводжується нарощенням діаметра відбитку, яка залежить від властивостей та твердості зміцнюваного матеріалу, $m_1 \approx 18 - 35$;

n_1 – кількість повторних переходів, $1 \leq n_1 \leq 5$;

a_1 – ширина ударної ділянки деформівного елемента, $a_1 = 0,5 - 1,6$ мм.

Якщо зміцнюють сталевими кульками, тривалість обробки рівна:

$$T_{змк} = \frac{4 m_1 \cdot d \cdot \ln \left[\frac{4D}{d} \left| \ln \left(1 - \frac{\pi d^2}{4D^2} \right) + 1 \right. \right]}{\pi d^2 \cdot f \cdot \left| \ln \left(1 - \frac{\pi d^2}{4D^2} \right) \right|}. \quad (6)$$

У *четвертому розділі* здійснено експериментальну перевірку теоретичних залежностей щодо визначення силових параметрів зміцнювачів відцентрової дії, досліджено вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на непрямі показники надійності зубчастих коліс.

Згідно з експериментальними даними, як у випадку використання деформівних елементів, так і при зміцненні зубів вільно розміщеними у їх впадинах сталевими загартованими кульками основними конструктивними параметрами, що обумовлюють силу та енергію деформування, є маса та ексцентриситет обкатника і параметри вібрацій. Особливості впливу параметрів зміцнювача на силу деформування під час зміцнення коліс із сталі 40Х модулем $m=5$ мм та кількістю зубів $z=27$ характеризується прямопропорційною тенденцією (рис. 3). Залежно від конструктивних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювача сила деформування сягає $P = 8 - 10$ кН.

Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними незначна (12 – 15%), що дозволяє використовувати теоретичні залежності у розрахунках і проектуванні зміцнювачів.

Отримані результати дозволяють окреслити сферу доцільності використання того чи іншого різновиду деформівних елементів – у разі потреби підвищення опору матеріалу зуба на злам рекомендоване зміцнення радіусного переходу в ніжку зуба деформівними елементами; якщо ж метою зміцнення є підвищення зносотривкості матеріалу – ефективнішим є зміцнення сталевими кульками. Для складних умов експлуатації, коли пошкодження бокової поверхні зубів супроводжуються їх поломками чи викришуванням

металу, необхідне двоетапне зміцнення – на першому етапі деформівними елементами радіусних переходів зубів для підвищення опору матеріалу втомі, на другому – сталевими кульками для покращення зносостійкості матеріалу завдяки формуванню мікрорельєфу бокової поверхні із лунками – западинами, у яких надійно утримується мастильний матеріал під час експлуатації

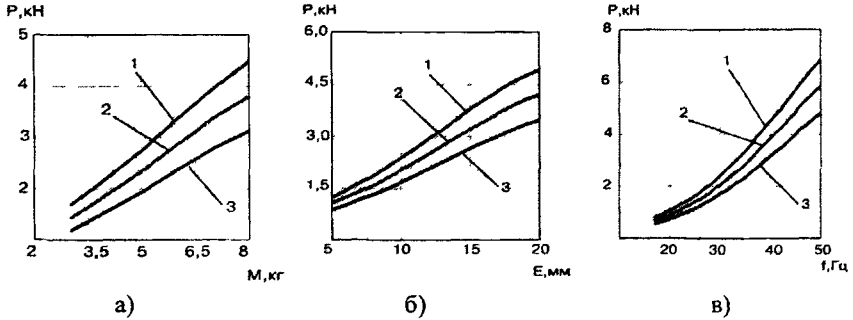


Рис. 3. Залежність сили деформування матеріалу бокової поверхні зуба від конструктивних параметрів зміцнювача: а) маси обкатника (ексцентриситет обкатника $\varepsilon = 12,5$ мм, частота коливань $f = 24$ Гц); б) ексцентриситету обкатника (маса обкатника $m = 5,5$ кг; частота коливань $f = 24$ Гц), в) частоти коливань зубчастого колеса (маса обкатника $m = 5,5$ кг; ексцентриситет обкатника $\varepsilon = 12,5$ мм); 1, 2, 3 – вплив параметрів на ділянках відповідно радіусного переходу у ніжку зуба, поверхні головки зуба та ділильного кола.

Основними технологічними параметрами процесу ВВЗК під час зміцнення деформівними елементами є:

- сила деформування $P, \text{Н}$;

- площа контакту деформівних елементів з боковою поверхнею впадини зуба $S_k, \text{мм}^2$;

- кількість повторних проходів – n , шт.

При зміцненні сталевими загартованими кульками:

- сила деформування $P, \text{Н}$;

- діаметр деформівних кульок $D, \text{мм}$;

- тривалість зміцнення $T, \text{хв}$.

Дослідження впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК на показники якості зміцнювальної обробки проводили на умовно поділених за твердістю на три групи сталей, які найчастіше використовують для виготовлення зубчастих коліс силових передач: конструкційній сталі 45 низької групи твердості (до HB197), легованій сталі 40X середньої групи

твердості (до HB207), високолегованій сталі 40ХН2МА високої твердості (понад HB217). Характер впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК на показники якості зміцнення відображено у вигляді рівнянь регресії другого порядку та графічних експериментальних залежностях. Наприклад, отримано залежності товщини зміцненого шару матеріалу від впливу технологічних параметрів процесу ВВЗК деформівними елементами під час обробки коліс із сталі 40Х (рис. 4).

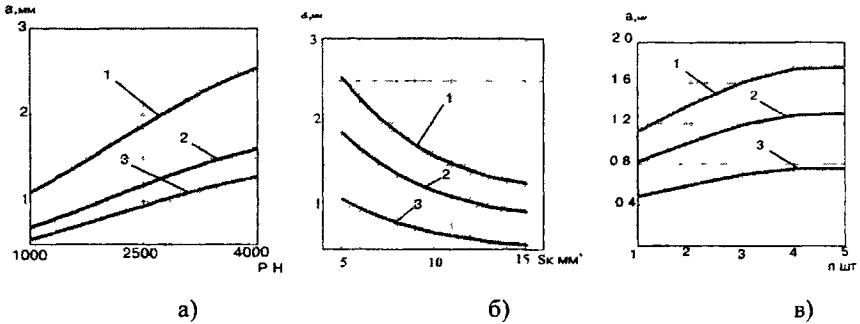


Рис. 4. Вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на товщину зміцненого шару матеріалу бокової поверхні зуба: а) сили деформування P (кількість повторних переходів $n = 3$; площа контакту деформівних елементів з боковою поверхнею зуба: 1 – $S_k = 5 \text{ мм}^2$; 2 – $S_k = 10 \text{ мм}^2$; 3 – $S_k = 15 \text{ мм}^2$); б) площі контакту деформівних елементів з боковою поверхнею зуба S_k (кількість повторних проходів $n = 3$; сила деформування: 1 – $P = 4 \text{ кН}$; 2 – $P = 2,5 \text{ кН}$; 3 – $P = 1 \text{ кН}$); в) кількості повторних проходів n (площа контакту деформівних елементів з боковою поверхнею зуба $S_k = 10 \text{ мм}^2$; сила деформування: 1 – $P = 4 \text{ кН}$; 2 – $P = 2,5 \text{ кН}$; 3 – $P = 1 \text{ кН}$)

Так, при зміцненні ВВЗК деформівними елементами сталі 40Х за два повторних проходи забезпечується товщина зміцненого шару $a = 1,2 \text{ мм}$, поверхнева мікротвердість $H_\mu = 9,5 \text{ ГПа}$ із ступенем зміцнення $\varepsilon = 30\%$, залишкові напруження стиску $\sigma_o = 1500 - 1650 \text{ МПа}$.

При зміцненні сталевими кульками цих коліс, відповідно, забезпечується $a = 0,8 \text{ мм}$, $H_\mu = 7,5 \text{ ГПа}$, $\varepsilon = 25\%$, $\sigma_o = 900 \text{ МПа}$. Шорсткість бокової поверхні зуба при цьому, знаходиться в межах $R_a = 1,2 - 1,5 \text{ мкм}$ і вона незначною мірою залежить від початкової шорсткості поверхні. На хвилястість бокової поверхні зубів вібраційно-відцентрове зміцнення суттєвого впливу не має.

У *п'ятому розділі* викладено результати дослідження ефективності зміцнювальної обробки ВВЗК з розглядом впливу її технологічних параметрів на зносостійкість матеріалу зубів та проведено натурні стендові порівняльні випробування зміцнених зубчастих коліс.

Дослідження на зносотривкість матеріалу виконували на кільцевих зразках, зміцнених вібраційно-відцентровою обробкою аналогічно зміцненню зубчастих коліс на машині тертя МТ-1М в оливному середовищі. Залежно від режимів зміцнювальної обробки та властивостей матеріалу, зносостійкість матеріалу, завдяки покращенню його фізико-механічних властивостей, формуванню зносостійкого мікрорельєфу, зростає в середньому на 30 - 45%. Крім цього, поліпшуються умови роботи трибопари і в результаті зростає на 10 - 15% зносостійкість контактуючої із зміцненою поверхнею нормалізованої шліфованої вкладки (контргіла).

Натурні випробування на зношування зміцнених ВВЗК проводили на спеціальному стенді, досліджуючи та порівнюючи зношування в оливному середовищі еталонних зубчастих коліс, виготовлених за типовим технологічним процесом, із зміцненими, виготовленими за запропонованою технологією. Еталонне і зміцнене колеса вводили в зачеплення, надавали обертання одному з них, а друге пригальмовували, імітуючи експлуатаційні навантаження. Дослідження проводили на базі 10^6 циклів на зубчастих колесах із сталі 40Х ($m=5$ мм, $z=27$) редуктора заднього ходу зернозбирального комбайна. У технологічному процесі виготовлення досліджуваних коліс, на відміну від еталонних, оздоблювально-вікінчувальні операції (швінгування, притирання) замінено зміцненням ВВЗК. Згідно з результатами випробувань зносостійкість матеріалу зміцнених коліс на 25 - 30% перевищує такий показник еталонних.

Для промислового впровадження вібраційно-відцентрової зміцнювальної обробки зубчастих коліс розроблена вібраційна машина, принципова схема якої наведена на рис. 5. Вібрмашина призначена для зміцнення деформівними елементами або сталевими кульками зубчастих коліс з діаметром діляльного кола до 250-300 мм.

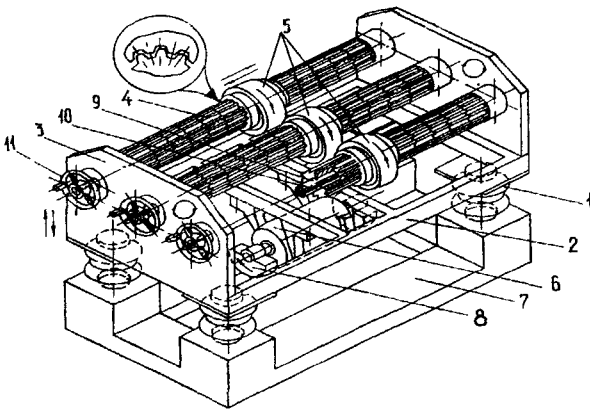


Рис. 5 Вібрмашина для зміцнення зубчастих коліс

Призначені до зміцнення зубчасті колеса набирають у блоки 4, які закріплюють на пружно встановленій на пневмобалонах 1 рамі 2. На кожному із блоків 4 розташовують зміцнювач 5 відцентрової дії і від вібробудника 6 рамі 2 надають плоскопаралельних коливань з амплітудою, рівною модулевій зміцнюваних коліс, та частотою 17 - 50 Гц. Зміною тиску у пневмобалонах 1 забезпечують нахил рами під кутом до горизонту, внаслідок чого зміцнювачі 5 переміщуються вздовж блоків 4, по чергово обробляючи всі зубчасті колеса. Для вищеназваних зубчастих коліс із $m = 5$ мм та $z = 27$ продуктивність зміцнювальної операції становила 100 шт./год. Вібрмашина проста за конструкцією, зручна в експлуатації, не потребує обслуговуючого персоналу високої кваліфікації.

Розроблено методику розрахунку та проектування як зміцнювачів відцентрової дії, так і вібрмашин для ВВЗК, відповідні програми, які дають змогу виконувати розрахунки засобами обчислювальної техніки.

Метод вібраційно-відцентрового зміцнення зубчастих коліс силових передач впроваджено на дільниці ремонту і матеріального забезпечення Стрийської нафто-газорозвідувальної експедиції ДП "Західукргеологія" (Львівська область) для підвищення довговічності зубчастих коліс редукторів приводу бурового верстату А50 та редукторів рольганга подачі бурових труб. Загальний річний економічний ефект від підвищення ресурсу редукторів бурового устаткування склав 30,4 тис. грн.

ВИСНОВКИ

1. Сучасні технологічні процеси виготовлення зубчастих коліс силових передач зорієнтовані в основному на забезпечення геометричної точності профілю зубів і недостатньо ефективні щодо формування необхідних фізико-механічних властивостей матеріалу зубів, зокрема його зносостійкості, опорам втомі та викришуванню, які є визначальними стосовно надійності та довговічності зубчастих передач. Наявні в процесах оздоблювально-викінчувальні операції покращують, переважно, лише чистоту поверхні, обмежено використовувані зміцнювальні операції, через недостатню енергію деформування, не забезпечують необхідного напружено-деформівного стану матеріалу. Це зумовлює потребу у розробці та ґрунтовному дослідженні нових методів зміцнювальної обробки матеріалу робочих поверхонь зубів, спроможних на етапі виготовлення зубчастих коліс формувати стійкий до зношування мікрорельєф поверхні зубів у поєднанні з покращенням властивостей матеріалу в приповерхневих шарах стосовно їх опору руйнуванню.

2. Розробленому методу вібраційно-відцентрового зміцнення циліндричних зубчастих коліс властиве поєднання високої продуктивності (до

100 коліс за годину) із значною (до 100 Дж) енергією деформування матеріалу робочої бокової поверхні зубів. Джерелом енергії деформування є обкочувальний рух масивних обкатників, який ідентичний рухові незрівноважених мас планетарних віброзбудників, ініційований вібраціями. Механічна коливна система в цілому являє собою пружно встановлену платформу із розміщеними на ній незалежними планетарними та дебалансними віброзбудниками, рух якої описують лінійні рівняння теорії синхронізації механічних віброзбудників.

3. В результаті розв'язку системи рівнянь синхронного руху коливної механічної системи із незалежними віброзбудниками отримано залежність для визначення сили взаємодії обкатників із деформівними елементами зміцнювачів відцентрової дії. Ця сила пропорційна масі та ексцентриситету обкатника і квадрату кругової частоти коливань привідного тіла - зміцнюваного зубчастого колеса.

3 дотриманням умов синхронних рухів незрівноважених обертових і обкатних мас дебалансних та планетарних віброзбудників встановлено умови самозбурення і стійкого підтримування обкочувального руху обкатників зміцнювачів відцентрової дії. Самозбурення обкатування відбувається за умови перевищення амплітуди коливань привідного тіла певного критичного значення A_{min} , що залежить від ексцентриситету обкатника і сил опору обкочувальному руху.

4. Використовуючи методика тензометрії експериментально встановлено залежність сили деформування матеріалу бокової поверхні зубів в процесі ВВЗК від конструктивних параметрів обкатника. Цим підтверджено результати теоретичного дослідження, якими встановлено, що маса і ексцентриситет обкатника прямопропорційно впливають на силу деформування, збільшуючи її при своєму нарощенні, а частота коливань зміцнюваного зубчастого колеса - у квадратичній залежності. Залежно від конструктивних параметрів обкатника зміцнювача сила деформування сягає $P = 8 - 10$ кН. Розбіжність між теоретично встановленими значеннями сили деформування і експериментально визначеними у разі використання деформівних елементів не перевищує 10%, а при застосуванні сталевих загартованих кульок - 15%, що є підставою для використання теоретичних залежностей в інженерних розрахунках конструктивних параметрів зміцнювачів вібраційно-відцентрової дії.

5. Експериментально встановлено, що найістотніший вплив на товщину зміцненого шару в процесі ВВЗК мають сила деформування і площа контакту деформівних тіл із зміцнюваною боковою поверхнею зуба. Із збільшенням сили товщина зміцненого шару зростає, із збільшенням площі контакту - зменшується. При застосуванні деформівних елементів визначено оптимальну кількість повторних проходів ($n = 2+3$), при зміцненні сталевими кульками - оптимум тривалості зміцнення обумовлений твердістю матеріалу зміцнюваного зубчастого колеса. Експериментально встановлені значення товщини

зміцненого шару (1,2 - 1,5 мм при зміцненні деформівними елементами, 0,75 - 0,8 мм – при обробленні сталевими кульками) близькі до розрахованих за теоретичною залежністю. Це підтверджує можливість використання залежностей у проектуванні технологічних процесів вібраційно-відцентрового зміцнення зубчастих коліс.

6. Визначальний вплив на рівень і характер розподілу у приповерхневих шарах зміцненого ВВЗК матеріалу залишкових напружень стиску мають не окремо взяті сила деформування P чи площа контакту деформівних тіл із боковою поверхнею зуба S_k , а їх співвідношення $\frac{P}{S_k}$. Найвищі значення залишкових напружень ($\sigma_0 = 1300 - 1350$ МПа для сталі 45 низької групи твердості; $\sigma_0 = 1500 - 1650$ МПа для сталі 40Х середньої групи твердості; $\sigma_0 = 2000 - 2500$ МПа для сталі 40ХН2МА високої групи твердості) забезпечуються за співвідношення $\frac{P}{S_k} = (0,75 - 0,85)\sigma_T$, а із збільшенням чи зменшенням цього значення вони зменшуються. Максимум залишкових напружень забезпечується після 2 - 3 повторних проходів і 10 - 15 хвилин зміцнення, залежно від твердості матеріалу.

7. Шорсткість зміцненої бокової поверхні зубів, як і рівень залишкових напружень, не залежно від попередньої перед зміцненням обробки (зубофрезерування чи зубошліфування), обумовлена співвідношенням $\frac{P}{S_k}$.

Вона є найнижчою для співвідношення $(0,75 - 0,85)\sigma_T$, і зростає при виході за вказаний діапазон. Якщо зміцненню ВВЗК передують зубофрезерування із початковою шорсткістю $R_z = 25 - 30$ мкм внаслідок зміцнення за оптимальних технологічних параметрів шорсткість при використанні деформівних елементів зменшується до $R_a = 2 - 2,5$ мкм, а при застосуванні кульок - до $R_a = 1,25 - 1,5$ мкм. При зміцненні шліфованих бокових поверхонь зубів із початковою шорсткістю $R_a = 0,25 - 0,63$ мкм шорсткість зміцненої поверхні зростає відповідно до $R_a = 1,5 - 2,0$ мкм і до $R_a = 1,0 - 1,25$ мкм.

8. Порівняльні стендові натурні випробування еталонних зубчастих коліс із сталей 45 та 40Х, виготовлених за типовим технологічним процесом, при їх зачепленні із зубчастими колесами, процес виготовлення яких включав додаткову зміцнювальну операцію ВВЗК сталевими загартованими кульками, засвідчили зменшення в середньому на 40 - 45% зношуваності матеріалу зміцнених зубів, яку оцінювали за величиною зменшення товщини зуба на ділянці діляльного кола. Випробування проводили в оливному середовищі на базі 10^6 циклів.

9. Оскільки головним робочим рухом процесу ВВЗК є рух обкочування масивного обкатника по деформівних тілах, основою якого є підтримання обертання тіла при гармонійних коливаннях його осі, яка самозбурюється і стабільно підтримується вібраціями, технологічним оснащенням для промислового використання процесу ВВЗК можуть бути спеціалізовані

вібраційні машини. Запропонований варіант конструкції передбачає одночасну зміцнювальну обробку до 100 штук зубчастих коліс з діаметром діляльного кола до 250 мм) Вібромашина не складна за конструкцією і проста в експлуатації, передбачає можливість регулювання технологічних параметрів процесу, механізацію зміцнювальної операції.

10. Розроблена методика розрахунку вібраційних машин та зміцнювачів ВВЗК дає змогу здійснювати розрахунок всіх основних вузлів та складових елементів цього оснащення, зокрема пружної підвіски, віброзбудників, двигунів приводу, межі регулювання технологічних параметрів. Створене на її основі відповідне програмне забезпечення для ЕОМ спрощує розрахунки вібромашини для різних варіантів їх конструкції залежно від розмірів зміцнюваних зубчастих коліс.

Основний зміст дисертаційної роботи викладений у таких публікаціях:

1. Афтаназів І.С., Берник П.С., Сивак Р.И., Клименко А.Д. Вибрационно-центробежная упрочняющая обработка деталей машин. – Винница: ВДАУ, 2002. – С.235.

2. Клименко О.Д. Оптимізація конструктивних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнювача зубчастих коліс //Вісник НУ "Львівська політехніка", 2003, № 480 – С. 58-68.

3. Афтаназів І.С., Струтинська Л.Р., Клименко О.Д. Ефективність зміцнення зубчастих коліс вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою //Розвідка та розробка нафтових і газових копалин. Всеукраїнський шоквартальний наук.-техн. журнал, 2003, №2(7). – С. 22-28.

4. Афтаназів І.С., Клименко О.Д. Підвищення надійності зубчастих коліс вібраційно-відцентровим зміцнювальним оброблюванням //Вісник НТУУ "Київський політехнічний інститут", Машиностроение, 2002, №43. – С 74-77.

5. Афтаназів І.С., Юрчишин І.І., Клименко О.Д. Вплив технологічних параметрів процесу ВВЗК на чистоту зміцненої бокової поверхні зубів //Збірник наукових праць Донбаської державної машинобудівної академії "Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем". Випуск 14. – Краматорськ, 2003. – С. 106-118.

6. Афтаназів І.С., Клименко О.Д. Аналіз і перспективи застосування ППД для підвищення надійності зубчастих коліс силових передач //Вісник Технологічного університету Поділля. Частина 3. Соціально-гуманітарні, психолого-педагогічні науки. Хмельницький, 2002, №4. – С. 131-137.

7. Афтаназів І.С., Клименко О.Д. Підвищення опору зношуванню матеріалу зубців зубчастих коліс вібраційно-відцентровим зміцнювальним обробленням. Тези доповідей 6-го міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові. – Львів, 2003. – С. 105.

АНОТАЦІЯ

Клименко О.Д. Підвищення довговічності силових зубчастих передач вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук із спеціальності 05.02.08 - технологія машинобудування. - Національний університет "Львівська політехніка". - Львів, 2004.

Робота присвячена підвищенню надійності та довговічності циліндричних зубчастих коліс силових передач методом зміцнення бокової поверхні їх зубів розробленою вібраційно-відцентровою зміцнювальною обробкою. На основі теоретичного та експериментального дослідження динаміки зміцнювача відцентрової дії розроблено новий метод поверхневого зміцнення із підвищеним рівнем енергії деформування матеріалу, а також необхідне обладнання для високопродуктивної зміцнювальної обробки

Досліджено вплив конструктивних параметрів зміцнювачів на силу деформування і технологічних параметрів процесу - на показники якості зміцнювальної обробки Розроблено принципіві схеми конструкцій зміцнювачів з деформівними тілами - сталевими кульками та з деформівними елементами спеціальної форми. Створено методику розрахунку і проектування засобами обчислювальної техніки зміцнювачів та вібротомашин для реалізації процесу.

Ключові слова: зубчасте колесо, зміцнення, деформування, деформівні тіла, вібрації, обкочувальний рух, зміцнювач, вібраційна машина.

SUMMARY

Klymenko O D Increase of load-carrying toothed transmissions longevity with vibrational-centrifugal hardening processing. – The manuscript.

Thesis for a candidate degree by a speciality 05.02.08 - mechanical technology - National university " Lvivska politechnika". - Lviv, 2004.

The activity is devoted to increase of cylindrical cog-wheels of load-carrying transmissions reliability and longevity by hardening a lateral area them teethes with the developed method of vibrational-centrifugal hardening processing. On bases of theoretical-experimental researches of hardener dynamics centrifugal operation the method of surface hardening with an increased level of deformation energy of a material necessary equipment for high-duty hardening processing is developed

The influence of design data hardeners on ensured deformation force and technological parameters of process on parameters of quality hardening processing is investigated. The concept of hardener is developed, in quality of deforming bodies in which the steel balls or deforming elements of the special shape are used. The technique of calculation and designing by means of computer facilities hardeners and vibrational machines for implementation of process is created

Key words: cog-wheel, hardening, deforming, deforming bodies, vibrations, rolling motion, hardener, vibrational machine.

АННОТАЦИЯ

Клименко О.Д. Повышение долговечности силовых зубчатых передач вибрационно-центробежной упрочняющей обработкой. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 - технология машиностроения. - Национальный университет "Львівська політехніка". - Львов, 2004

Работа посвящена повышению надежности и долговечности цилиндрических зубчатых колес силовых передач методом упрочнения боковой поверхности их зубьев разработанной вибрационно-центробежной упрочняющей обработкой. На основании теоретических и экспериментальных исследований динамики упрочнителя центробежного действия разработан метод поверхностного упрочнения с повышенным уровнем энергии деформирования материала, а также необходимое оборудование для высокопроизводительной упрочняющей обработки.

Исследовано влияние конструктивных параметров упрочнителей на силу деформирования и технологических параметров процесса - на показатели качества упрочняющей обработки. Разработаны принципиальные схемы конструкций упрочнителей, в качестве деформирующих тел в которых использованы стальные шарики или деформирующие элементы специальной формы. Создана методика расчета и проектирования средствами вычислительной техники упрочнителей и вибротриков для реализации процесса.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка использованной литературы и приложения.

В первом разделе выполнен анализ технологических процессов производства цилиндрических зубчатых колес силовых передач, который показывает, что резервы повышения надежности и долговечности зубчатых передач заложены именно в технологии производства колес, а именно – в качественной их финишной обработке. Существующие операции финишной обработки несовершенны с точки зрения обеспечения надлежащих показателей качества материала, его напряженно-деформированного состояния. Создание нового метода упрочняющей обработки боковой поверхности зубьев колес и стало основным научным направлением данной работы.

Во втором разделе изложено описание сущности нового метода упрочняющей обработки, которая состоит в передаче материалу зубьев ударного воздействия деформирующими телами от обкатывающегося по ним массивного обкатника, приводимого в движение вибрациями. Его отличительная особенность – повышенный уровень энергии деформирования.

Здесь же рассмотрены методики исследования, используемое измерительное оборудование, аргументирован выбор основного направления исследования.

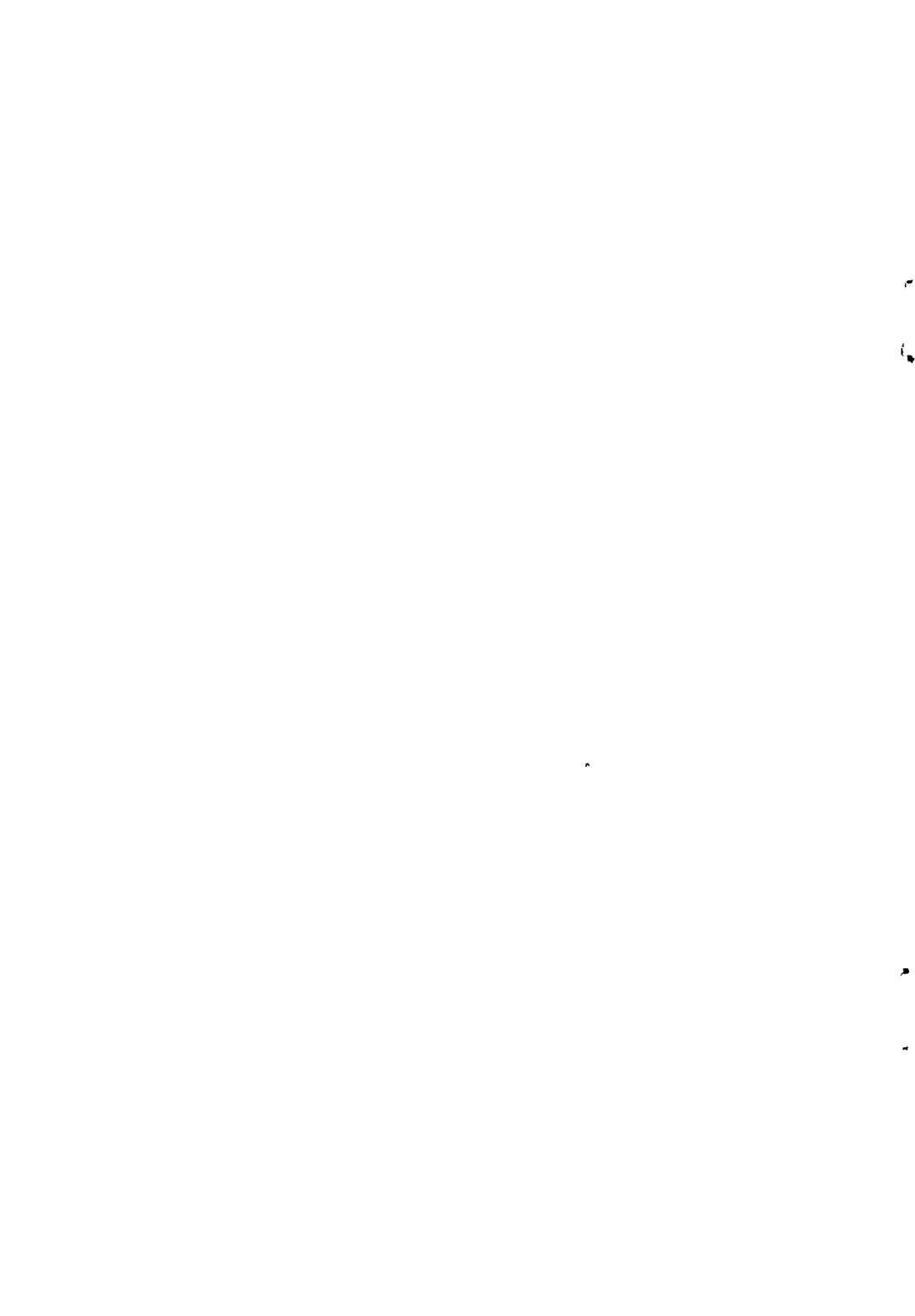
В третьем разделе приведены результаты исследования динамики упрочнителя центробежного действия. На основе решения системы уравнений движения составляющих элементов упрочнителя получены зависимости для определения силы и энергии деформирования материала зубьев, прогнозирования толщины упрочненного слоя, выбора оптимального времени упрочнения. На базе полученных зависимостей разработана методика расчета и проектирования упрочнителей.

В четвертом разделе изложены результаты экспериментального исследования процесса вибрационно-центробежной упрочняющей обработки. Определены основные конструктивные параметры упрочнителей, регламентирующие силу и энергию деформирования. Установлены основные технологические параметры процесса – сила деформирования, площадь контакта деформирующих элементов с поверхностью впадины зуба, диаметр деформирующих шаров, время обработки и количество повторных проходов. Экспериментально исследовано их влияние на показатели качества обработки – толщину упрочненного слоя, поверхностную микротвердость, остаточные напряжения в материале зубьев, шероховатость и волнистость упрочненных поверхностей. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений технологических параметров упрочняющей обработки.

В пятом разделе на основе испытаний упрочненных образцов на износ и натуральных стендовых сравнительных испытаний упрочненных зубчатых колес подтверждена эффективность предложенного метода упрочнения. Износостойкость материала зубчатых колес (сталь 45, 40Х, 40ХН2МА) в среднем увеличивается на 25 - 30%.

Приведена принципиальная схема конструкции разработанной вибрационной машины для промышленного внедрения процесса, методика ее расчета и проектирования средствами вычислительной техники. Вибромашина рассчитана на обработку зубчатых колес с модулем 5 - 15 мм и диаметром до 250 - 300 мм и ее производительность может достигать 100 штук в час.

Ключевые слова: зубчатое колесо, упрочнение, деформирование, деформирующие тела, вибрации, обкатное движение, упрочнитель, вибрационная машина.



Формат 60×90 1/16 арк. Папір друк.

Ум. друк. арк. 0,86.

Тираж 100 прим. Зам.1263

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі ЛДТУ
43018, м. Луцьк, Львівська, 75

РНБ Русский фонд

2004-6

932